



综述

面向星地融合的6G 云雾化自组网

彭木根, 袁硕

(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 低轨星座朝支持星上处理、功能可重构、星地协作和通信遥感导航控制等多任务一体化的方向演进, 受限于星上信号处理和计算能力不足、星间链路容量不宽等瓶颈, 迫切需要和具有强大云化处理与计算能力的陆地移动通信网络深度融合。为此, 提出了面向星地融合的6G 云雾化自组网的体系架构和协议体系, 实现了低轨雾化卫星网络和陆地云化通信网络的协同融合, 研究了基于星上雾化处理的通信遥感导航控制一体化波形和资源管理, 以及云雾化协同的移动性管理和智能信息处理等关键技术, 展望了未来的标准化工作和硬件试验。

关键词: 星地融合网络; 6G; 云雾化; 自组网

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024083

Toward satellite-terrestrial integration: 6G cloud-fog collaborative self-organizing network

PENG Mugen, YUAN Shuo

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Low earth orbit (LEO) satellite constellations are evolving to support on-board processing, reconfigurable functions, satellite-terrestrial cooperation, and the coordinated execution of multiple tasks, including communication, sensing, navigation, and control. However, LEO satellite networks are constrained by bottlenecks such as inadequate signal processing and computing capabilities of individual LEO satellites and constrained inter-satellite link capacity, necessitating a deep integration with terrestrial mobile communication networks that include extensive cloud-based processing and computing capabilities. Therefore, an innovative architecture for an integrated satellite-terrestrial-based 6G cloud-fog collaborative self-organizing network was proposed and its protocols were discussed, achieving the deep integration of LEO fog-based satellite networks and terrestrial cloud-based communication networks. In addition, key technologies such as integrated communication, sensing, navigation, and control waveform, as well as re-

收稿日期: 2024-03-01; 修回日期: 2024-03-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2021YFB2900200); 国家自然科学基金资助项目 (No.61925101); 北京市自然科学基金资助项目 (No.L223007)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2900200), The National Natural Science Foundation of China (No.61925101), The Beijing Natural Science Foundation of China (No.L223007)



source management based on satellite onboard fog processing, along with mobility management and intelligent information processing based on cloud-fog collaboration, were elaborated in detail. In the end, insights into future directions for standardization and hardware experimentation were presented.

Key words: satellite-terrestrial integrated network, 6G, cloud-fog collaboration, self-organizing network

0 引言

随着信息和通信技术的飞速发展,业务需求和应用场景日趋多样化,无线网络迫切需要在通信深度和广度上呈现质的飞跃,以提供更多元的信息服务和更高的覆盖能力、传输速率和连接稳定性^[1-2]。陆地移动通信网络由于其物理和技术限制,难以满足全球无缝覆盖和高效可靠连接的需求。低轨卫星通信网络以其低成本发射、广域覆盖及高抗毁性成为有效的解决方案,已被国家发展和改革委员会明确列为新基建发展范畴^[3-4]。陆地移动通信网络与低轨卫星通信网络深度融合以构建星地融合网络,提供面向全覆盖和泛在连接泛在服务的无线网络基础设施,已成为6G的关键特征^[5]。

另一方面,通信、遥感、导航和控制等多样化的任务需求,以及增强/虚拟现实和自动驾驶等新兴智能业务,对低轨卫星载荷设计和星地融合网络组网方法提出了更多挑战^[6]。具体而言,传统卫星的单任务载荷功能与硬件深度耦合,无法满足多任务服务需求且难以进行高效的星间和星地功能协同;新兴智能业务在满足通信能力的基础上,对计算能力的供给也提出了较高的性能要求。在此背景下,软件定义卫星载荷技术和雾化处理技术受到广泛关注^[7]。与云化的集中式信号处理和计算存储不同,雾化侧重网络边缘(基站)、终端(终端直接通信和计算处理)和业务的一体化可重构的信号处理和计算存储。考虑6G低轨星座要实现星上的边缘化处理,星间要实现端与端的直通,且星上要可重构地实现通信、遥感、导航、控制等功能,低轨卫星可以视

为边缘一体化的雾节点,多卫星共同组成了低轨雾化卫星网络。低轨雾化卫星网络受限于单星的处理与计算能力及能量消耗,需要和陆地移动通信网络强大的云化处理和计算能力协同,因此,面向星地融合的雾化无线网络是低轨星座的核心关键技术,它可以完成以业务为中心的功能按需重构^[8]。例如,对于卫星电子侦察任务,通过可重构为雷达载荷,在星上完成相应的雷达信号处理、高分辨率成像、移动目标探测等功能,从而实现星上信息处理和目标识别,并可通过通信雷达感知一体化信号处理,把星上处理和识别后的信息传递到陆地通信网络,且可以利用陆地强大的云化处理能力,进一步提升目标识别准确度。

此外,低轨星座雾节点和业务流量快速增长,加之星地网络拓扑具有高动态特征,传统人工网络管理方式逐渐变得低效,使得运营商面临巨大的资本和运营成本压力。随着人工智能(artificial intelligence, AI)的快速发展,面向雾节点的分布式智能化和面向陆地云处理中心的集中式智能化协同是雾化无线网络的关键技术。因此,面向星地融合的6G雾化自组网充分利用AI技术,能够分析业务性能需求,通过与环境持续互动制定网络配置方案并自行决策何时以及如何执行该方案,从而减少人工干预实现无线网络的自主管理,实现星地融合网络的智能自组织^[9]。

星地融合雾化自组网作为一种全新机制,由于要实现低轨雾化卫星网络和陆地云化通信网络的协同融合,面临技术和网络体系结构难统一、组网效率低下、资源协同困难等挑战,同时也带来了能耗加剧、切换频繁、安全性难以保障

等问题^[2,10]。为了实现自组网,业界先后提出了意图网络^[11]和智简网络^[2]等AI驱动的新型智能网络形态。例如,意图网络设想通过对用户或网络意图进行智能解析,自主生成并执行网络配置方案,实现网络自配置、自优化、自修复,这些已有研究将有力地推动星地融合网络向云雾化自组网演进。

为了响应国家“一星多用、多星组网、多网协同、智能服务”战略目标,针对云雾化自组网面临的技术挑战和发展趋势,本文提出了面向星地融合的6G云雾化自组网体系架构,分析了其关键技术与挑战,并对未来的标准化工作和硬件试验进行了展望。

1 相关工作

1.1 星地融合网络

低轨卫星网络与陆地移动通信网络的融合,是实现全球无缝覆盖和高速泛在连接愿景的关键。两者的融合经历了互联互通、陆地移动通信终端直连低轨卫星网络、协同可重构自组网等阶段,融合过程从业务层面的整合向体制和系统架构的全面融合逐步演进,共同推进星地融合的深度和广度^[12]。

自20世纪90年代起,卫星与陆地移动通信系统的融合探讨和尝试已持续进行。早期的北美卫星移动通信系统部分利用了地面模拟蜂窝网络技术,而如铱星系统和Globalstar的低轨道星座

则部分基于全球移动通信系统(global system for mobile communications, GSM)标准和码分多址数字蜂窝标准设计其空中接口^[13]。从2010年开始,我国开展了基于长期演进(long term evolution, LTE)技术标准的卫星移动通信技术研究,并于2012年5月向国际电信联盟提交了用于卫星通信系统的LTE标准草案。2016年发射的天通一号卫星也部分采用了3GPP标准。尽管这些早期系统和方案具有创新性,但它们大多作为独立网络运作,与陆地移动通信网络在业务和体制方面融合的程度依旧有限。

星地融合网络演进趋势如图1所示。随着火箭可回收技术和一箭多星技术的创新,互联网卫星星座如国外的Starlink、OneWeb、Kuiper、TeleSat及国内的“鸿雁”“虹云”和“银河”等项目快速发展,这些星座计划采取合作互补的市场策略,通过统一的互联网协议技术实现了与地面互联网的业务融合,如图1(a)所示。同时,业界也探索了基于多模终端的星地体制融合解决方案,如图1(b)所示。在这一技术路径中,苹果手机通过集成Globalstar卫星通信模块实现卫星短消息发送功能;华为Mate 50通过内置北斗通信模块支持L频段的单向短报文通信,而Mate 60则内置天通卫星通信模块,提供卫星通话和短消息服务。针对存量手机终端的星地网络体制融合实验也在积极推进,Lynk Global成功发射技术验证卫星,并与现有手机完成双向语音通信的外场

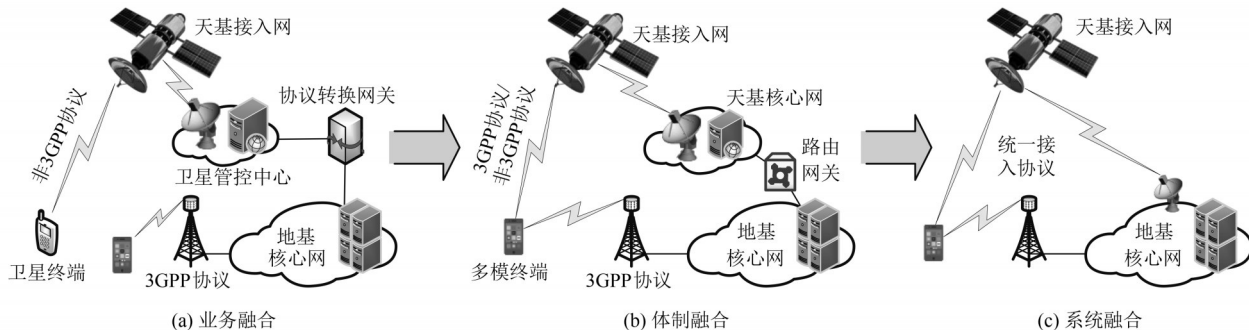


图1 星地融合网络演进趋势



实验验证；SpaceX与T-Mobile合作，已实现通过Starlink卫星为LTE手机用户提供直连卫星服务；AST & Science的低轨道试验卫星BlueWalker 3通过装备大型相控阵天线，已实现与现有手机的通话和5G连接测试^[3]。

标准化工作方面，3GPP从Release 14 (Rel-14)版本开始卫星通信与5G陆地移动通信的兼容研究，并在Rel-15版本引入非地面网络 (non-terrestrial network, NTN) 概念^[14-15]。随后，通过SA和RAN工作组，3GPP启动了多项针对5G卫星通信的研究项目和技术标准，并将卫星接入方式作为5G接入技术的一部分^[16]。特别是在Rel-17版本中，3GPP实现了5G网络与包括卫星在内的NTN之间的协作标准化，以促进无缝连接，Rel-18版本将进一步优化以卫星为核心的NTN通信协议，以期实现如图1(c)所示的星地系统融合。2022年8月，中国移动和中兴通讯合作，利用GEO通信卫星，验证了基于Rel-17版本NTN技术的短消息和语音对讲业务。

1.2 自组织网络

星地融合网络不仅需要应对通信、遥感、导航、控制等多类型任务需求，还需要针对不同业务场景满足差异化的时延、数据传输速率和可靠性要求。这种多维度的服务需求涉及云化处理和雾化处理资源的高效协同，同时也需要结合网络切片和软件定义无线电等技术，以确保网络的灵活性和可扩展性。然而，随着端到端星地移动网络在功能和结构上日益丰富与复杂，系统整体的复杂性将显著增加，给网络管理和运营维护带来极大挑战。网络自组织技术被业界普遍视为应对上述挑战的关键技术，其通过实现高水平的网络管控自动化将大幅提升网络规划、部署、运维和优化等各环节效率^[17]。

3GPP首次在Rel-8版本引入自组织网络（简称自组网）技术，并在随后的标准化工作中不断演进和完善，其中提出集中式、分布式、混合式

3种自组织网络架构，定义了自配置、自优化和自修复的用例和基本流程^[18]。从Rel-16版本开始，3GPP开始标准化5G中自组织网络的用例和要求^[19]。产业界方面，AirHop通信公司设计开发了eSON的商用虚拟化自组织网络平台，实现无线网络资源的多站点自动协调，以及覆盖范围、容量和移动性的自优化。近年来，随着AI在无线网络中的应用，业界普遍期待网络自组织能够进一步增强灵活性和自适应性，并提出诸如意图网络和智简网络等智能化网络形态。其中，意图网络设想通过识别业务和网络意图，并将意图转译成网络策略，在自动化执行网络策略之后通过持续监控网络状态和性能，自主修复潜在问题。2022年，中国电信和中国移动等公司提出的基于开放式网络自动化平台发布意图网络开源方案，实现由“业务意图交互闭环”和“网络意图保障闭环”组成的意图网络双闭环架构，推动智能自组织网络的商业化部署^[20]。

近年来，“零接触网络管理”作为一种完全自主的网络管理方案备受业界关注，旨在实现从无线电接入网资源调度到业务自动化处理，再到内容的主动缓存和端到端网络切片等网络管理活动的完全自动化，标志着网络管理向更高级别的智能化迈进^[21]。2017年，欧洲电信标准组织 (ETSI) 成立了专门的行业规划小组，旨在定义零接触网络管理下网络智能化和自动化的要求和架构^[22]。此外，Innovile公司的INTELLIGENT SON解决方案以零接触网络为目标，通过设计专有算法和AI模型持续优化网络配置和参数，实现简单、灵活、经济高效的网络自动化。

总之，面向低轨雾化卫星网络和陆地云化通信网络的融合需求，为了实现星上载荷按需功能可重构，以及低轨雾化卫星网络和陆地云化通信网络间的信号处理、计算存储和AI处理的动态协同，需要实现两者间的自组网。需要注意的是，两者间全面自组网的实现是一个逐步深化的过

程,从最初的基本操作自动化到基于人工智能进行复杂环境感知和监控以及自主决策,每一步都是对依赖人工的网络管理模式的深度挑战和创新。

1.3 云化无线网络

随着移动互联网的快速发展,用户对通信容量的性能需求日益提高。传统无线电接入网架构在满足该需求时,需要部署大量基站,这不仅导致能耗和资本及运营成本的大幅上升,而且难以应对潮汐效应导致基站利用率不高以及互联网业务爆炸性增长给核心网带来巨大负载压力等挑战。在此背景下,中国移动于2010年基于云化处理提出了云无线电接入网(cloud radio access network, C-RAN)架构,作为面向5G技术的接入网解决方案。为了实现C-RAN和已有的宏基站间协同组网,业界提出了异构云无线电接入网(heterogeneous C-RAN, H-CRAN)架构^[23],如图2所示。H-CRAN通过将传统大功率节点(high power node, HPN)拆分为远端射频单元(remote radio head, RRH)和基带处理单元(baseband unit, BBU),并集中BBU形成BBU池进行大规模集中式协同信号处理和资源管理,不仅有助于解决RRH间干扰,实现频谱资源的共享与复用,降低基站的建设和维护成本,还能有效改善网络规划与优化的复杂度。然而, H-

CRAN面临前传链路容量受限和集中式云端信号处理导致业务处理时延增加等不足。

为了克服H-CRAN架构的局限性,结合雾化处理技术,提出了云化协同的雾无线电接入网(fog radio access network, F-RAN)架构^[24],如图3所示。F-RAN利用边缘接入节点和终端的信号处理、计算存储等,将计算和控制功能部分下沉至网络边缘,形成雾节点,如雾接入节点(fog access point, FAP)和雾用户(fog user equipment, FUE),以支撑用户业务的本地化处理和存储。FAP实现了网络边缘(基站)、终端和业务的通信功能、缓存功能和AI计算功能的一体化,可以根据业务的差异化需求灵活重构基站和终端的通信和计算模式,例如,为了降低时延,可以直接在基站端进行业务缓存和边缘AI处理;为了减少对网络资源的占用,可以进行FAP间的直接通信;通过在雾节点和终端对业务进行分布式协同处理,F-RAN能够实现对用户请求的快速响应和数据的就近处理,不仅显著降低了业务交付时延,提升了数据处理效率,还减轻了前传链路与云中心的负载,从而增强了网络的可靠性与扩展性。需要注意的是,F-RAN是在图2的H-CRAN基础上,增加实现了雾化处理功能,FAP不仅实现了通信计算融合,也实现了通信计算和感知融合,采用通用的硬件架构进行软件定义的功能可重构,既可以实现FAP间的直接通信,也可以进行面向智能服务的接入网功能重构,实现一体化的无线电接入网自适应满足各种新增应用和极致化性能目标需求。因此,严格来说,F-RAN实际上应该称为云化协同的无线电接入网,云化处理主要是减少基站间的干扰,提供巨容量性能需求,也是充分挖掘云化处理和AI计算能力;而雾节点则是充分利用边缘信号处理、计算存储、AI计算、终端直通能力,实现极低时延、面向通感一体的高精度定位和探测、网络化感知、绿色通信等性能目标。

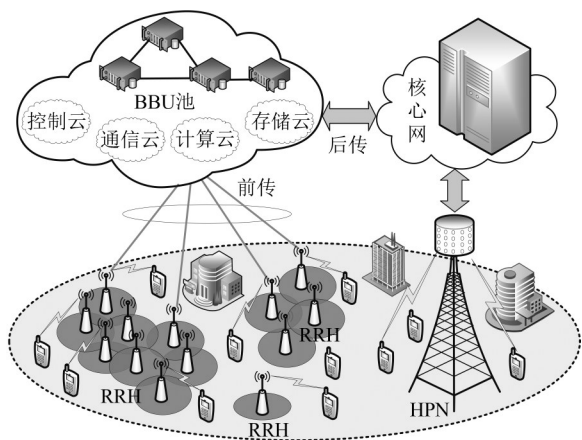
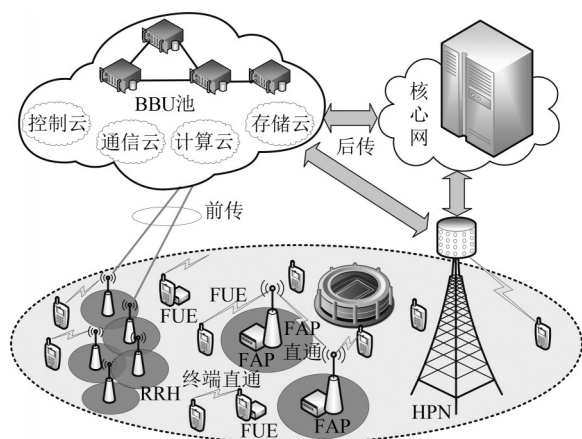


图2 异构云无线电接入网架构^[23]

图3 云雾化协同的雾无线电接入网架构^[24]

2 面向星地融合的6G云雾化自组网架构

随着通信、遥感、导航、控制等任务场景和商业模式的多样化,以及不同应用的性能需求日益差异化,传统的地面或单独的卫星网络架构难以支撑通信、遥感、导航、控制等功能的自适应实现,相应的资源固化难以灵活调配和高效利用。为此,本文提出了一种面向星地融合的6G云雾化自组网体系架构,设计了该架构的网元与协议体系,通过陆地云化处理、计算存储和AI计算,以及低轨星座雾节点的边端业一体化和功能可重构部署,进行云雾化资源协同融合和集中式AI与边缘分布式AI协同等,实现星地云雾化自组网,更好地提供通信、遥感、导航、控制算等多功能融合的极高数据速率、极低时延、超高可靠和超高智能度的服务。

2.1 星地融合的云雾化自组网体系架构

传统卫星载荷主要是面向单任务或者单业务设计,如通信、遥感和导航卫星等,但面临技术需要更新换代、多任务间需要融合等挑战,卫星载荷朝多样化、可重构和一体化等方向演进。此外,低轨星座要实现网络化,除了卫星通过地面信关站进行组网外,星间互联也是重要的组网模式。因此,低轨卫星需要在星上根据任务差异进行可重构可升级,且进行信号和计算处理,卫星

的边端业一体化是实现通信、遥感、导航、控制、组网等功能融合的关键。

本文提出的面向星地融合的6G云雾化自组网体系架构如图4所示,包括天基部分和地基部分,其中天基部分主要由低轨卫星雾节点组成,基于星上雾化处理能够实现通信、遥感、导航、控制等多功能融合,以及星间直通和星地协作等;地基部分主要包括终端、地面基站、地面信关站和云化中心等,能够提供强大的云化处理和计算能力,通过云雾化协同能够满足多样化业务的差异化性能需求。具体而言,低轨卫星雾节点基于软件定义载荷技术搭载通信、遥感、导航、控制等多功能载荷,实现面向功能需求的载荷按需重构,并且基于星载计算存储资源实现如信号和数据处理、AI计算、内容缓存以及路由交换等星上雾化处理。借助软件定义网络(software defined network, SDN)与网络功能虚拟化(network functions virtualization, NFV)等技术,网络和业务功能可以进行轻量化设计和细粒度切分,并根据业务需求、网络状态、组网形态在卫星雾节点进行灵活可重构部署。例如,卫星雾节点可按需重构接入网用户面功能、控制面功能以及部分核心网功能以支撑星上雾化处理进行终端直通、星间直通以及缓存业务内容和AI计算等服务,实现低轨卫星、终端和业务的一体化。

陆地云化通信网络和低轨雾化卫星网络通过协同构成一个混合集中式和分布式通信、计算、遥感和导航等资源的融合框架,支持根据业务场景和性能需求进行云雾化协同适配处理。以计算任务为例,如果时延敏感、性能受限单卫星雾节点的计算任务可以卸载至邻近的卫星雾节点进行边缘处理,而广域多目标复合型业务可以通过星间链路进行雾节点自组网,实现星间协同计算;对于计算密集且时延不敏感业务,可以在卫星雾节点进行预处理之后将其迁移到陆地云计算中心利用云化的计算资源进行更细粒度的数据处理,

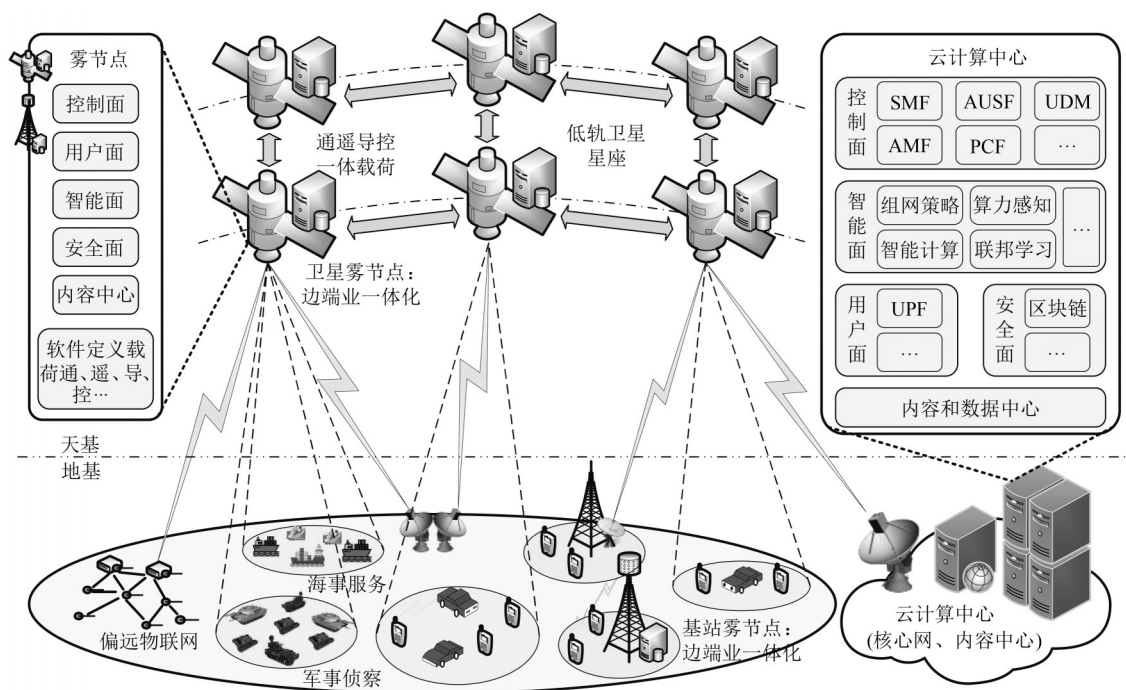


图4 面向星地融合的6G云雾化自组网体系架构

实现云雾化算力协同, 以提升业务处理效率和响应速度。

该架构基于SDN和NFV技术分离网络控制逻辑和数据转发功能, 为网络管理的灵活性和动态性提供基础, 进而通过包括控制面、用户面、安全面和智能面在内的四面协同构建分布式服务框架, 支撑星地分布式按需自组网, 以适应星地网络的异构性、时变性、分布式等特征。其中, 控制面针对通信、遥感、导航、控制等多类型任务和增强/虚拟现实以及自动驾驶等新兴业务性能需求, 提供对星上信号处理、感知、计算、存储、安全等能力的管控支持; 通过强化网络传统控制功能, 增加卫星雾节点控制功能、星地云雾化协同管控功能以及对四面总体控制功能, 实现强鲁棒性的移动性管理和高利用率的云雾资源管理等。对于用户面, 强化传统用户平面功能的服务能力, 针对低轨分布式雾节点提供自组网策略、信息交互、服务管理等可编程接口以提升用户面协议栈性能, 实现业务传输和处理的效率与

多样性。智能面是网络智能化的基础, 既负责为网络管控提供AI模型以支撑星地智能自组网, 同时承载用户业务所需的AI服务。陆地云化的计算资源和低轨星座雾化的计算资源为网络泛在智能提供算力支撑, 通过地面集中式AI和雾节点分布式AI的高效协同, 能够有效应对网络管控和业务交付对于时效性、可靠性和智能化日益增长的需求。安全面提供内生的网络安全, 基于风险主动探测、防护动态调整和多域协作策略构建可信安全体系, 并基于区块链设计跨域数据管理机制, 以保障网络管控和数据传输的安全性。通过四面协同, 进行以任务为中心的星地云雾化智能自组网, 提供满足多极致性能需求的服务, 实现6G多域融合、算网一体和泛在智能的愿景。

2.2 网元与协议体系

所提架构包括低轨雾化卫星网络和陆地云化通信网络, 涉及的网元主要有用户终端 (user equipment, UE)、卫星雾节点 (satellite fog access point, Sat-FAP)、核心网 (next generation



core, NGC) 和内容中心 (content hub, CH) 等。其中, 卫星雾节点融合基站、终端直通、边缘计算和边缘存储等, 承载包括用户面、智能面和安全面等功能的完整基站单元, 并且能够可重构部署轻量化的移动性管理功能 (access and mobility management function, AMF) 和会话管理功能 (service management function, SMF) 等核心网功能, 以及缓存业务所需的内容和 AI 服务等。

基于卫星雾节点雾化处理能力, 多个卫星雾节点能够自主构建同轨、异轨星间直通链路, 实现如图 5 所示的多星雾节点端间直通自组网, 支撑如数字单兵和应急搜救等局部多任务场景。具体而言, 卫星雾节点具有完整基站协议和数字处理能力, 并承载下沉的轻量化核心网功能以及缓存业务所需的内容和 AI 功能, 能够根据低轨空间拓扑自主构建星间链路, 基于星上路由网关 (satellite gateway, Sat-GW) 进行星间数据交换, 实现雾节点间的数据协同传输; 能够在卫星雾节点和终端间对业务进行自适应拆分、迁移和处理, 实现边缘业务一体化, 完成以业务为中心的多星资源自适应调度, 提升业务响应速度。对于部分不具备卫星接入功能的终端, 可以接入支持卫星无线电接口 (satellite radio interface, SRI) 的地面基站, 并使用星地链路与卫星雾节点进行星

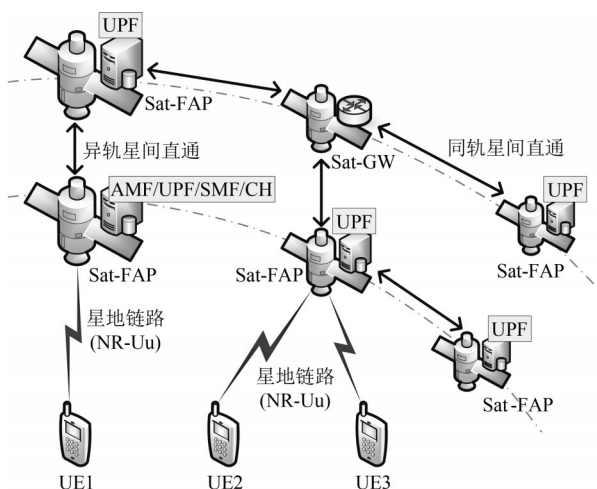


图5 多星雾节点端间直通自组网

地雾节点自组网。

针对卫星雾节点受限的计算处理能力和能量难以独立支撑计算密集型业务的情况, 卫星雾节点可以基于星地链路与陆地云化通信网络进行星地云雾自组网, 如图 6 所示。通过陆地的云化处理与 AI 计算能力和卫星雾化处理与分布式 AI 能力的协同, 支撑面向通遥一体的高精度目标识别和广域气象监测等复杂型任务。例如, 在星地云雾化自组网情况下, 遥测数据在卫星雾节点进行数据预处理之后, 可以将预处理结果交付给地面云中心进行更细粒度的遥测目标分析和识别, 实现云雾化数据接力处理。另外, 部署有 AMF 和 SMF 等轻量化核心网功能的雾化卫星可通过与陆地移动通信网络的移动性管理网元进行云雾化协同的切换决策, 实现用户星间和星地的无缝切换。

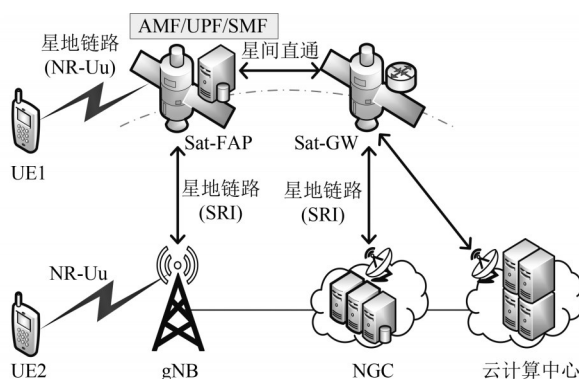


图6 星地云雾自组网

为了保障如军事侦察和气象监测等多样化场景中通信、遥感、导航、控制等多任务一体化的数据传输和处理的效率、可靠性与安全性, 高效安全的网络协议体系不可或缺。传统的地面网络协议由于未能充分考虑卫星通信特征, 如传播时延高、误码率高和链接间歇的可用性等, 往往难以直接应用于星地融合网络。为此, 国际空间数据系统咨询委员会基于网络层 IP 协议制定了空间通信协议规范, 但高昂的开发和维护成本限制了

其广泛应用。时延容忍网络 (delay tolerant network, DTN) 通过在应用层和传输层之间加入协议层进行“存储-转发”以实现不同协议间的转换,能够有效克服卫星连接的间歇性问题^[25]。目前,以IP为基础、兼容底层物理层应用的分布式协议设计是星地网络协议发展的主要方向,并且基于SDN技术设计智能路由协议能够有效提升星地星间多跳数据传输性能^[8]。

3 关键技术

3.1 基于单星雾化处理的一体化波形

传统的低轨卫星系统由于技术限制以及应用需求相对单一,面对不同的任务需求,如通信、遥感、导航、控制等,通常采用不同的波形设计和信号处理方式,硬件结构和天线以及使用的频段和带宽也存在诸多差异。然而,随着软件定义载荷和软件定义无线电等技术的快速发展和任务需求日趋多样化,单一任务导向的低轨卫星系统设计的局限性逐渐显现,如系统灵活性和扩展性受限,资源利用率低,以及难以同时满足多任务需求等。从资源利用效率来看,频谱资源本身较为稀缺,尤其是在卫星通信方面,单任务波形设计方式意味着不同系统间无法进行频谱共享,造成频率闲置和浪费;从多任务需求来看,随着社会数字化和智能化程度不断加深,多任务协作需求也日益增长,例如,在灾害监测和救援中,通

信、遥感、导航等任务协同能够提供更加及时和精准的灾区信息,将极大地提高救援效率^[26]。

基于单星雾化处理能力对通信、遥感、导航、控制等任务进行一体化的波形设计已受到业界广泛关注。其中,通感一体化波形设计目标是通过共享通信与感知的硬件资源及频谱资源,在同一硬件平台上利用同一波形同时完成高速率传输和高精度感知,不仅能够降低甚至去除通信信号与感知信号间的干扰,与雷达与通信系统采用双系统发射模式相比,还能显著降低系统功耗^[26]。此外,通感一体化波形设计还能显著提高资源利用效率,确保在获取感知目标信息的同时实现信息的互传,通过感知辅助通信和通信辅助感知实现对系统功能整合与性能的进一步增强。目前普遍认为能够适应高移动和频率选择性衰落环境的正交时频空 (orthogonal time frequency space, OTFS) 调制是实现通感一体化波形的关键技术,通感一体化波形设计示意图^[27]如图7所示。

现有的通导一体化波形设计主要包括导航覆盖增强的通导一体,如卫星雾节点间通过实时通信进行位置信息交互,提高多星、星地协作定位性能,以及通信覆盖增强的通导一体,如基于导航定位授时帮助星地雾节点确定用户位置进行定向波束成形,提高通信质量^[28]。例如,北京邮电大学研究团队将正交频分复用 (orthogonal fre-

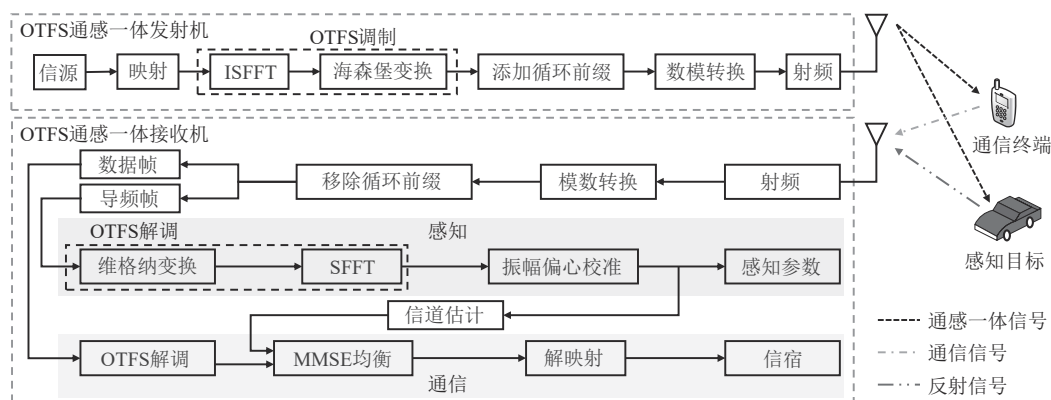


图7 通感一体化波形设计示意图^[27]



quency division multiplexing, OFDM) 信号与短码和长码两种伪距噪声码复用于同一频段提出时码正交频分复用 (time & code division-OFDM, TC-OFDM) 的通导一体波形, 实现高精度无缝定位^[29]。

3.2 基于单星雾化处理的多维资源管理

得益于集成电路和软件定义载荷技术的快速发展, 低轨卫星能够承载的资源类型愈加多样, 包括通信、计算、缓存、遥感、导航等, 不仅承担传统的通信传输任务, 还能通过按需对载荷进行重构实现通遥一体的军事侦察和通导一体的目标追踪等多样化任务。任务场景的日益丰富以及业务数据量的不断增加, 迫切需要实现通信、遥感、导航、计算和存储等多维资源的灵活调配。然而, 差异化的性能需求、复杂动态的星地网络拓扑以及星上多维资源间相互耦合相互制约导致资源调度和管理复杂度显著增加。通过利用虚拟化技术能够有效实现对通信、遥感、导航、计算和存储等异质资源的统一表征, 进而为多维资源的联合调配提供技术基础。

在不同业务场景与性能需求的前提下, 对业务进行自适应调度以及对资源进行按需匹配, 是发挥卫星雾化处理潜力的关键^[10]。相对于传统的中心化业务管理导致的资源调度响应时间长和网络节点负载不均, 卫星雾节点能在网络边缘进行业务的拆分和卸载等调度决策, 以及本地处理、边端协作和云雾协同等资源协同模式的按需匹配, 进而提高资源利用率和业务交付效率。例如, 对于智能驾驶场景中时延敏感且计算量小的控制业务, 可以在终端进行本地处理, 如目标识别和自动避障等简单型业务, 可以根据终端性能选择本地运算或卸载到雾节点; 如果涉及广域多目标复合型业务, 如多目标跟踪、实时路径规划等, 对时延和计算需求等具有较高的要求, 可以通过雾节点自组网构建星间和星地协同计算框架, 生成兼顾低时延、高能效和高可靠等多类型

性能需求的多维资源调配策略^[25]。

另一方面, 引入 AI 技术推进资源管理的自动化与智能化, 将进一步提升资源调度效率和网络性能。基于卫星雾节点计算能力部署的数据分析模型, 能够通过分析历史数据和实时信息, 准确预测网络负载、用户行为和服务需求, 实现粗粒度资源预调度; 基于强化学习等算法通过与实时网络环境交互进行自我学习和优化, 实现在动态的网络状态和业务需求下进行细粒度资源按需分配。由于星地和星间链路高动态特性与时变的信道状态, 可基于信道测量获取的信道状态信息以及智能算法驱动的信道估计方法, 在雾节点利用智能面提供的深度强化学习模型对传输链路中的物理层参数, 如调制与编码策略、资源块选择、功率控制等进行优化配置, 实现多维资源智能调配。

3.3 云雾化协同的移动性管理

尽管低轨卫星提供了广域的覆盖能力, 但其高速运动导致覆盖区域及与终端、信关站的连接频繁变更, 使得用户链路和馈电链路频繁切换^[30]。为了保障用户业务的连续性, 融合多种异构接入类型的星地网络不仅要处理同质网络内的频繁切换问题, 还需要应对不同接入系统间的移动性管理挑战。面对上述切换特征和需求, 传统的切换机制和移动性管理方法存在跟踪区域管理复杂、移动状态测量不准确、信令风暴等问题^[31]。例如, 低轨卫星和地面基站的跟踪区域定义方法不同、大小不一, 且低轨卫星单个跟踪区域下用户量相对较多, 导致寻呼信令开销显著增大。因此, 陆地的云化处理中心需要综合考虑卫星和地面通信网络的服务特征, 以及卫星星历信息、覆盖区域用户分布和业务需求, 智能调整跟踪区域大小和位置, 降低跟踪区域更新的频次和信令开销, 并且与星地雾节点协同对星内、星间和星地间切换策略进行优化, 实现云雾化协同的无缝切换。

现有的切换决策研究大多聚焦于最强信号强度、最长覆盖时间或最小负载等单一指标的切换优化,未考虑这些指标在低轨卫星通信场景潜在的不适配问题。例如,基于最强信号强度的切换机制虽适用于地面基站,由于其小区中心与边缘的信道损耗差异显著,但并不完全适合于卫星通信,因为卫星波束边缘与波束中心点的信号强度差异相对较小^[30]。因此,仅依赖终端测量结果进行切换决策具有较高的不准确性。文献[30]设计了包括卫星仰角、卫星空闲信道数、链路剩余存续时间和链路切换时延在内的多属性切换决策方案,通过综合考虑通信链路质量、卫星负载均衡、切换频率和时延的性能进行切换优化,降低切换频次和失败率。

面对异构高动态的星地网络,基于AI模型进行智能化切换决策,能够进一步提升切换效率和用户切换体验。通过综合卫星及地面雾节点的负载、业务类型和网络拓扑等多种因素进行云雾化协同的智能切换分析和需求匹配,预先确定用户切换时间和切换节点并进行接入信道和多维资源预调度,能够有效提升切换速度^[31]。同时,通过采用双激活协议栈切换技术,基于云雾化协同优化用户预切换策略,能够进一步保障业务连续性。

3.4 云雾化协同的AI技术

依托陆地的云化处理与计算能力,云端集中式AI面向业务能够提供高数据量高运行速度的智能服务,如包含数百万到数十亿个参数的视频分析和推荐系统等模型;面向网络管控则主要负责网络全局智能管理和优化,涵盖但不限于网络流量的长期趋势分析、资源的全局粗粒度调度策略以及安全威胁的监测与响应等。具体而言,通过分析历史数据,云端集中式AI可以预测在不同时间段内业务请求的变化,据此调整云资源的配置,或生成自组网策略等。与云端集中式AI相比,由于边缘节点有限的计算能力和能量,部署

在低轨卫星、地面基站或者终端上的分布式边缘AI主要进行轻量的即时数据处理和局部的实时决策。例如,分布式边缘AI可以根据感知到的交通状态和车辆接入请求,动态调整智能交通系统中的信号灯控制策略。

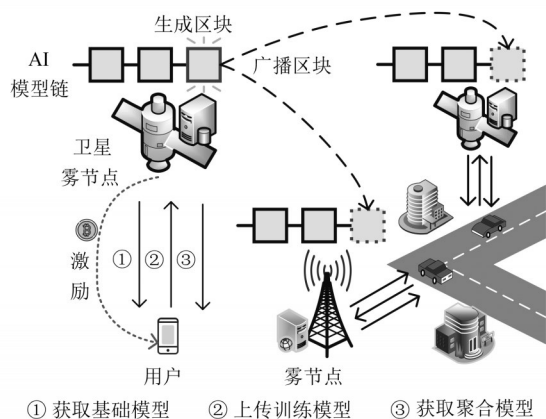
面向多样化的业务和场景提供智能化服务和智能化网络管理与优化的关键,在于陆地云端集中式AI功能与雾节点分布式AI功能的高效协同。云雾化协同的AI能够有效整合集中式和分布式AI的优势,按需提供包括计算密集的多目标优化以及低计算量的即时智能决策等智能服务。例如,从网络管控的角度,云端集中式AI提供全局的网络管控指导和支持,并通过下发模型更新和优化策略到分布式边缘AI,以提升边缘节点对动态网络环境的自主适应能力。分布式边缘AI将局部的数据和分析结果上报给云端,促进集中式AI模型的持续迭代和优化以实现更深入的网络分析和高适应性的网络管理。

另一方面,云雾化AI协同要求云雾间具有高效且安全的数据交换机制。为此,文献[32]针对分布式网络提出了基于区块链的联邦学习架构,如图8所示,实现在不进行集中式数据收集和存储的前提下利用全网数据进行更全面的网络分析和优化,从而提高数据隐私保护水平,减轻骨干网络的传输负荷,并缓解云计算中心的压力。这种结合了区块链和联邦学习优势的云雾化AI协同,不仅提升了模型的泛化能力,也大幅提高了网络的整体智能化水平,为星地网络提供了一种可靠且高度安全的云雾化智能解决方案。

4 未来展望

4.1 标准化工作

目前,关于6G的标准化工作仍处于初期阶段。3GPP和国际电信联盟等组织在5G的基础上开始探讨6G的愿景、关键技术以及潜在应用场景,其中包括星地融合以及人工智能赋能的自组

图8 基于区块链的联邦学习架构^[32]

织网络^[1]。为了实现面向星地融合的6G 云雾化自组网,首先需要促进不同硬件厂商和机构之间的互操作性,制定统一或兼容的通信协议和接口标准,包括数据传输格式、信号编解码、链路控制以及网络层协议等,以支持卫星间自组网和星地云雾化协同。随着星地自组网体系的复杂性增加,比如面向垂直行业的专网和网络切片,需要制定统一的安全标准和策略,包括数据加密、身份认证、访问控制和威胁监测等。为了提供一致性的服务,需要考虑卫星通信和陆地移动通信的特性,定义统一的资源分配机制和服务质量保证措施,如算力分配、数据存储以及性能评价等,以满足不同类型应用的性能需求。此外,还需要为算力和业务的动态调度制定相关的标准与协议,确保业务传输和处理全流程的完整性和安全性。

4.2 硬件试验

硬件试验是验证面向星地融合的6G 云雾化自组网概念及其技术的关键环节。通过硬件试验,可以评估技术方案的可行性、稳定性和性能,为技术优化和迭代提供依据。中国移动联合相关厂商搭建了面向再生载荷的星载核心网原型系统“星核”,其硬件基于标准接口的板卡拔插式设计,以便面向不同任务场景进行硬件改造与适应性调整;软件方面,采用全IP化设计理念,

支持在轨UPF可重构部署及自主管理^[9]。该系统实现星上计算处理,为星上业务卸载和算力调度提供了硬件支撑。此外,清华大学研究团队研发了面向自组网的通感一体化原型机,实现在卫星导航数据缺失的情况下,提供全网高精度时钟同步,保证集群协同感知能力,并支持自组网长距离协同传输^[33]。中国卫通集团研究团队开发了新型通导遥融合应用的信息智能服务系统,并利用当前的通导遥空间资源,对我国西藏察隅地区重大灾害的日常监测和应急响应进行了仿真模拟^[34]。随着软件定义无线电和星间激光链路等技术的发展,相信不久的将来能够开发在轨可重构的雾节点硬件平台,支持通信、遥感、导航、控制一体化的雾化处理以及业务自适应迁移。

5 结束语

本文围绕全场景广覆盖和通信遥感导航控制等多任务一体化需求,探讨了低轨星座和陆地移动通信网络融合的相关研究,提出了面向星地的6G 云雾化自组网架构及关键技术,以期为6G网络的研究和演进提供新视角,为基于星上雾化处理的通信、遥感、导航、控制一体化波形和资源管理以及基于云雾化协同的移动性管理和人工智能等关键技术的突破提供新思路。同时展望了未来的标准化工作和硬件试验的需求,期待国内外合作与产业协同以推动星地云雾化自组网的商业化进程。

参考文献:

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021.
International Mobile Telecommunications-2030 (6G) Promotion Group. White paper on 6G vision and candidate technologies[R]. 2021.
- [2] 彭木根, 孙耀华, 王文博. 智能6G无线电接入网: 架构、技术和展望[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(3): 1-10.
PENG M G, SUN Y H, WANG W B. Intelligent-concise radio access networks in 6G: architecture, techniques and insight[J].

- Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(3): 1-10.
- [3] 孙耀华, 许宏涛, 彭木根. 手机直连低轨卫星通信: 架构、关键技术和未来展望[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 103-110.
SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.
- [4] YUAN S, PENG M G, SUN Y H, et al. Software defined intelligent satellite-terrestrial integrated networks: insights and challenges[J]. Digital Communications and Networks, 2023, 9(6): 1331-1339.
- [5] IMT-2030(6G)推进组. 6G网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021.
International Mobile Telecommunications-2030 (6G) Promotion Group. White paper on architecture vision and key technology outlook of 6G network[R]. 2021.
- [6] 彭木根, 张世杰, 许宏涛, 等. 低轨卫星通信遥感融合: 架构、技术与试验[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 13-24.
PENG M G, ZHANG S J, XU H T, et al. Communication and remote sensing integrated LEO satellites: architecture, technologies and experiment[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 13-24.
- [7] 袁硕, 任奕璟, 王则予, 等. 软件定义的星地融合智能无线网络[J]. 电信科学, 2021, 37(6): 66-77.
YUAN S, REN Y J, WANG Z Y, et al. Software defined intelligent satellite-terrestrial integrated wireless network[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(6): 66-77.
- [8] YUAN S, SUN Y H, PENG M G. Joint network function placement and routing optimization in dynamic software-defined satellite-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023(99): 1-15.
- [9] 中国移动通信研究院. 6G天地一体分布式自治网络白皮书[R]. 2024.
China Mobile Research Institute. White paper on 6G integrated space-terrestrial distributed autonomous network[R]. 2024.
- [10] 亚森江·阿布都热合曼, 段卓君, 刘向南, 等. 6G星地融合网络资源管理关键技术[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 47-55.
YASENJIANG A, DUAN Z J, LIU X N, et al. Key technologies for resource management of 6G satellite-terrestrial integrated networks[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 47-55.
- [11] 周洋程, 闫实, 彭木根. 意图驱动的6G无线电接入网络[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 72-79.
ZHOU Y C, YAN S, PENG M G. Intent-driven 6G radio access network[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 72-79.
- [12] 林琳, 朱斌, 王泽林, 等. 5G星地融合标准演进与趋势[J]. 移动通信, 2023, 47(7): 92-97.
LIN L, ZHU B, WANG Z L, et al. Evolution and trends of 5G satellite-terrestrial integration standards[J]. Mobile Communications, 2023, 47(7): 92-97.
- [13] 汪春霆, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面5G的融合初探(一)[J]. 卫星与网络, 2018(9): 14-21.
WANG C T, LI N, ZHAI L J, et al. A first look at the convergence of satellite communications and terrestrial 5G (I) [J]. Satellite & Network, 2018(9): 14-21.
- [14] 3GPP. Study on using satellite access in 5G: TR 22.822[S]. 2018.
- [15] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811 v15.4.0[S]. 2020.
- [16] 3GPP. Service requirements for the 5G system: TR 22.261[S]. 2016.
- [17] CHAOUB A, MÄMMELÄ A, MARTINEZ-JULIA P, et al. Hybrid self-organizing networks: evolution, standardization trends, and a 6G architecture vision[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2023, 7(1): 14-22.
- [18] PENG M G, LIANG D, WEI Y, et al. Self-configuration and self-optimization in LTE-advanced heterogeneous networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(5): 36-45.
- [19] 3GPP. Management and orchestration; self-organizing networks (SON) for 5G networks: TR 28.313 V17.9.0[S]. 2023.
- [20] 中国运营商主导ETSI与LFN合作完成首期ACTN测试 加速自智网络服务落地商用[N]. 人民邮电报, 2022-05-30.
The collaboration of ETSI and LFN led by Chinese operators has completed the first phase of ACTN testing, accelerating the commercialization of self-intelligent network services[N]. People's Posts and Telecommunications News, 2022-05-30.
- [21] CORONADO E, BEHRAVESH R, SUBRAMANYA T, et al. Zero touch management: a survey of network automation solutions for 5G and 6G networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(4): 2535-2578.
- [22] ETSI. Zero-touch network and service management (ZSM); landscape: GR ZSM 004 V2.1.1[S]. 2022.
- [23] PENG M G, LI Y, JIANG J M, et al. Heterogeneous cloud radio access networks: a new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 126-135.
- [24] PENG M G, YAN S, ZHANG K C, et al. Fog-computing-based radio access networks: issues and challenges[J]. IEEE Network, 2016, 30(4): 46-53.
- [25] 姜宁, 章川扬之, 亢晨宇, 等. 基于通信感知计算融合的低轨卫星网络体系架构与关键技术[J]. 无线电通信技术, 2023,



- 49(5): 842-852.
- JIANG N, ZHANG C Y Z, KANG C Y, et al. Low earth orbit satellite network based on communication, sensing and computing integration: architecture and key technologies[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 842-852.
- [26] 吴晓文, 焦侦丰, 刘冰, 等. 面向6G的卫星通感一体化[J]. 移动通信, 2022, 46(10): 2-11.
- WU X W, JIAO Z F, LIU B, et al. Satellite integrated sensing and communication for 6G[J]. Mobile Communications, 2022, 46(10): 2-11.
- [27] LIU X Q, YANG Y R, GONG J L, et al. Amplitude barycenter calibration of delay-doppler spectrum for OTFS signal-an endeavor to integrated sensing and communication waveform design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023(99): 1-16.
- [28] 王兆祺, 徐然, 公佳龙, 等. 通信导航一体化波形关键技术及研究进展[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 853-864.
- WANG Z Q, XU R, GONG J L, et al. Key technologies and research progress of integrated communication and navigation waveform design[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 853-864.
- [29] DENG Z L, YU Y P, YUAN X, et al. Situation and development tendency of indoor positioning[J]. China Communications, 2013, 10(3): 42-55.
- [30] 王则予, 张梦菲, 孙耀华, 等. 星上透明转发非地面网络中的切换机制[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(6): 101-108.
- WANG Z Y, ZHANG M F, SUN Y H, et al. Handover mechanism design in non-terrestrial networks with transparent satellites[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(6): 101-108.
- [31] 徐冰玉, 杜斌, 李侠宇. 与5G融合的卫星通信移动性管理技术研究[J]. 国际太空, 2021(11): 53-57.
- XU B Y, DU B, LI X Y. Research on mobile management technology of satellite communication combined with 5G[J]. Space International, 2021(11): 53-57.
- [32] YUAN S, CAO B, SUN Y, et al. Secure and efficient federated learning through layering and sharding blockchain[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024 (99): 1-15.
- [33] 沈渊, 胡可可, 孙铭, 等. 面向自组网的通感融合技术及软硬件设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(4): 472-481.
- SHEN Y, HU K K, SUN M, et al. ISAC technologies and hardware-software design for Ad Hoc network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(4): 472-481.
- [34] 赵菲, 吕韞哲, 付东杰, 等. 新型通导遥融合应用的信息智能服务研究[J]. 航天器工程, 2023, 32(4): 109-120.
- ZHAO F, LYU Y Z, FU D J, et al. Research on information intelligence service using new communications, navigation and remote sensing integrated application[J]. Spacecraft Engineering, 2023, 32(4): 109-120.

[作者简介]



彭木根 (1978-), 男, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为6G、空间信息通信、通感算一体化、通算融合无线电接入网络等。



袁硕 (1994-), 男, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为星地融合无线网络。